DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.161107

贾方方, 洪权春, 宋唯一. 基于去包络线法的番茄叶霉病发病程度估测方法[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 805−811
Jia F F, Hong Q C. Song W Y. Continuum removal method for monitoring *Fulvia fulva* morbidity using hyperspectral data[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 805−811

基于去包络线法的番茄叶霉病发病程度估测方法*

贾方方[1,2], 洪权春[1**], 宋唯一[1]

(1. 商丘师范学院生命学院 商丘 476000; 2. 郑州大学 郑州 450002)

摘 要: 阐明番茄叶霉病(*Fulvia fulva*)光谱特征并对其发病程度进行估测, 可为番茄叶霉病大面积遥感监测提供依据。本研究通过分析番茄叶霉病不同发病程度下叶片光谱变化特征, 筛选对发病程度识别的敏感波段。并利用去包络线法对光谱反射率进行处理, 构建基于光谱特征吸收参量的发病程度估测模型。研究结果表明: 随着叶霉病病害等级的加深, 番茄叶片的原始光谱反射率、光谱敏感度、相对反射率均呈逐渐降低趋势; 可见光波段(550~730 nm)和短波红外波段(1 860~2 260 nm)是识别番茄叶霉病发病程度的最佳波段; 且随着病害等级的增加, 吸收波段位置(λ)向短波方向移动, 最大吸收深度(D_c)和吸收面积(A)均呈递增规律。利用光谱参数构建的番茄叶霉病病害等级预测的逐步回归模型 R^2 达 0.81, 且模型验证结果较好。研究结果对利用高光谱遥感技术定量估测番茄叶霉病发病程度以及监测、防治农作物病虫害均具有较高的实用价值。

关键词: 番茄; 叶霉病; 高光谱; 去包络线; 发病程度
中图分类号: S436.412 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)06-0805-07

Continuum removal method for monitoring *Fulvia fulva* morbidity using hyperspectral data*

JIA Fangfang[1,2], HONG Quanchun[1**], SONG Weiyi[1]

(1. Department of Life Science, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, China; 2. Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: *Fulvia fulva* is a major disease in tomato cultivation. Compared with traditional laboratory analysis method, hyperspectral remote-sensing technology can provide simple, cost effective and non-destructive information that can offer processing methods for diagnosing and quantifying plant health. However, there are many limitations (e.g., large volume of data, redundant information and complex spectral) in dealing with hyperspectral data. This paper aimed to clarify the spectrum characteristics of tomato leaf infected by *F. fulva* and estimate its morbidity degree to provide theoretic basis for large-scale monitoring of *F. fulva* using hyperspectral remote sensing. To this end, experiments were carried out in 2016 in with disease nursery of tomato *F. fulva* in Shangqiu. In the research, leaf spectral reflectance of tomato was acquired via ASD FieldSpec 3 spectrometer (350−2 500 nm). The continuum removal method was adopted to process the original spectrum reflectance of tomato leaf with different morbidity degrees of *F. fulva*. The bands sensitive to *F. fulva* morbidity degree were selected and an inversion model of morbidity degree established based on absorption parameters of the spectrum features. The results showed that spectral reflectance of healthy tomato plants was higher than that of disease plants in the wavelength range of 350−2 500 nm. Besides, the

* 国家自然科学基金面上项目(21575087)和河南省高等学校重点科研项目(16B210006, 16A210037)资助
**通讯作者: 洪权春, 主要研究方向为植物保护。E-mail: hongqc@sina.com
贾方方, 主要从事农业定量遥感与作物病虫害监测。E-mail: jiafang840928@163.com
收稿日期: 2016-12-02 接受日期: 2017-03-09

* This study was funded by the National Natural Science Foundation of China (21575087), the Key Scientific Research Program of Universities in Henan Province (16B210006, 16A210037).
**Corresponding author, E-mail: hongqc@sina.com
Received Dec. 2, 2016; accepted Mar. 9, 2017

reflectance, spectral sensitivity and relative reflectance decreased with increasing *F. fulva* morbidity degree. The most sensitive wave bands for distinguishing *F. fulva* severity were located in the visible region (550–730 nm) and shortwave infrared region (1 860–2 260 nm). With increasing *F. fulva* morbidity degree, the absorption position (λ) of both visible spectrum and shortwave infrared spectrum moved to the short wavelength band, while the maximum absorption depth (D_c) and area (A) increased. Particularly, the morbidity degree had a very significant correlation with maximum absorption depth in visible band (D_{c1}), maximum absorption area in shortwave infrared band (A_2), maximum absorption depth in shortwave infrared band (D_{c2}), position of maximum absorption depth in visible band (λ_1) and position of maximum absorption depth in shortwave infrared band (λ_2). Consequently, a stepwise regression model for *F. fulva* morbidity degree was built based on the spectral absorption parameters. The model had good validation results, with determination coefficient (R^2) of 0.81. The results of the study not only contributed to the estimation of *F. fulva* morbidity degree using hyperspectral remote-sensing data, but also had promising values of practical application in monitoring and preventing crop diseases.

Keywords: Tomato; *Fulvia fulva*; High spectrum; Continuum removal; Morbidity degree

番茄叶霉病(*Fulvia fulva*)是番茄(*Lycopersicon esculentum*)生产中的主要病害之一，流行速度快，极易暴发成灾[1]，一般造成减产 20%~30%，严重时可达 50%以上，给番茄生产带来巨大经济损失[2]。番茄叶霉病主要危害叶片，严重时危害茎、花、果实等。病斑多生于叶背，为不规则形淡黄色退绿斑[3]。发病严重时叶片干枯卷曲，后期导致全株叶片皱缩枯萎提早脱落[4]。叶片的变化必然引起反射光谱曲线发生改变[5-8]，因此，可利用地面高光谱遥感快速、无损、精准地监测番茄叶霉病，准确获取病害的发生程度，减轻农药错施和滥施对生态环境造成的污染。

去包络线法(continuum removal)又称连续统去除法，是一种消除不相关背景信息、增强感兴趣吸收特征的光谱分析方法[9-10]，可突出光谱的反射特征，消除背景吸收的影响，在地物信息光谱探测中得到了广泛应用[11]。竞霞等[12]借助于去包路线法利用红光(650~700 nm)特征参数建立了棉花(*Gossypium* sp.)黄萎病病情严重度的估测模型，认为红光波段特征吸收峰右半段面积建立的估测模型效果最好。韩兆迎等[13]利用去包络线法进行了苹果(*Malus sieversii*)树冠 SPAD 值的光谱估测，研究证明可见光波段的光谱指数同 SPAD 值相关性最高。丁丽霞等[14]运用去包络线法有效地解决了高光谱数据的冗余问题，并进一步实现了不同树种叶片的光谱鉴别。谢伯承等[15]运用去包络线法研究了土壤光谱反射特征与土壤有机质含量、黏粒等的相关性，认为 600~800 nm 波段的吸收面积同有机质相关性较好，而 1 800~2 100 nm 波段内的特征吸收面积则与土壤黏粒有较好的相关性，并建立模型预测土壤中黏粒含量。但在番茄叶霉病发病程度监测方面，尚未见利用去包络线法的相关报道。因此，本研究借助去包络线法，利用高光谱遥感数据建立发病程度反演模型，诊断番茄叶霉病发病程度。研究结果为解决番茄叶霉病提供信息支持，提高病害防治的管理效率和农药使用效率，保障生态平衡和农产品安全。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验时间为 2016 年 7—8 月，研究区域位于河南省商丘市梁园区建设街田庄村(34°29′4.76″N, 115°38′47.15″E)番茄叶霉病病圃田。试验面积为 150 m^2，供试品种为‘红果’。

番茄叶霉病病害分级标准：0 级，无病斑；1 级，病斑直径小于 0.5 cm; 2 级，病斑直径为 0.5~1 cm; 3 级，病斑占叶面积 1/5 以下; 4 级，病斑占叶面积 1/5 以上。

依据番茄叶霉病病害分级标准，分别选取番茄叶霉病病圃田自然发病下不同病害等级(1 级, 2 级, 3 级，4 级)植株进行光谱测定，同时选取健康植株作为对照(0 级)测定。

1.2 光谱数据测定

采用 Field Spec 3 便携式地物光谱仪(美国 ASD 公司)测定叶片光谱，波长 350~2 500 nm，其中 350~1 000 nm 光谱采样间隔 1.4 nm，光谱分辨率 3 nm; 1 000~2 500 nm 采样间隔 2 nm，分辨率 10 nm。ASD Leaf Clip 单叶光谱测试夹本身带有模拟光源，可在密闭环境下测定，操作稳定，测量误差小。每片番茄复叶上选取 5 个单叶测定，每次测定 10 条曲线，剔除异常值后取其平均值为该复叶的反射率光谱值。每次测定前均用标准参考白板进行校正。本研究共获取 250 组番茄叶片的光谱值，随机选取 150 组进行建模，其余 100 组用于模型的验证。

2 数据分析方法

2.1 去包络线法

去包络线法又称连续统去除法和基线归一法，

最初主要用于岩石矿物光谱特性的分析，其目的在于消除背景吸收影响，突出目标物的吸收特征[16]。“包络线”是指逐点直线连接随波长变化的反射凸出的峰值点，并使折线在峰值点上的外角大于 180°。以包络线为背景，“去包络线”就是用原始光谱反射率值除以相应波段包络线上的值得到的相对反射率曲线。经过去包络线后，那些峰值点上的对应反射率值变为 1，非峰值点的反射率值都小于 1。对光谱曲线去包络后，能够清晰地看到植被的吸收特征。图 1 为番茄叶片的原始光谱反射率、包络线及去包络线后的相对反射率 R'。

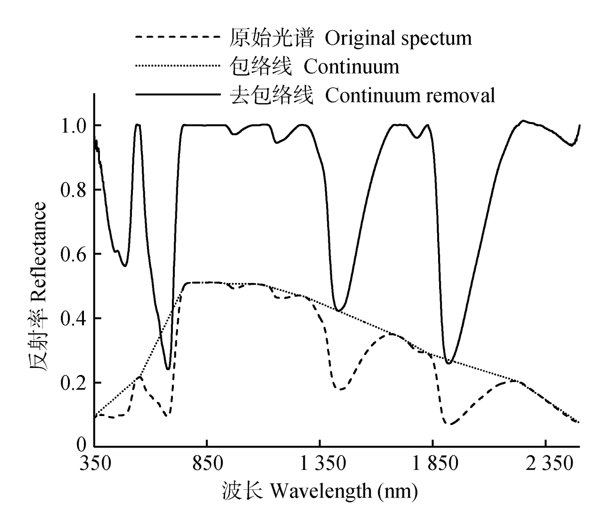


图 1　番茄叶片的原始光谱、包络线和去包络线
Fig. 1　Curves of original spectrum, continuum and continuum removal of tomato leaf

2.2　光谱吸收特征参量

对原始光谱反射率进行异常值剔除、平均、去噪等预处理后，在去包络线基础上提取其光谱吸收特征参量：

1)波段深度(D)的计算公式为：

$$D=1-R' \tag{1}$$

式中：R' 为各波长对应的去包络线后的反射率。

2)最大波段深度(D_c)，即波段深度的最大值。

3)吸收峰面积(A)的计算公式为：

$$A=\sum_{i=a}^{b} D_i \Delta\lambda \tag{2}$$

式中：a、b 为吸收波段的起始、结束值，D_i 为 i 波段的吸收深度，$\Delta\lambda$ 为波长增量。

3　结果与分析

3.1　番茄叶霉病不同病害等级的光谱反射率变化

番茄叶霉病会导致番茄叶片的形状和颜色发生变化，进而引起其光谱反射率改变。由图 2 可见，随着番茄叶霉病发病程度增加，350~780 nm 的可见光波段光谱反射率减小，主要原因是番茄叶片受叶霉病侵染后叶绿素组织遭到破坏，叶绿素等色素含量下降，番茄叶片变黄褪色，可见光光谱反射减弱，吸收明显增强。在 350~780 nm 的可见光波段，色素为主控因子，叶霉病导致色素含量降低，对相应波段的光谱吸收和反射均减少，导致光谱反射曲线发生改变[17]。780~1 350 nm 的近红外波段，反射率主要取决于叶片内部的细胞结构及排列[18]。该波段内，病害叶片的反射率也低于正常叶片，但差异不如可见光波段明显，表明叶霉病引起番茄叶片的厚度、细胞组织、结构、排列等的变化不如色素明显。1 350~2 500 nm 波段，正常植株叶片的光谱反射率明显高于病害叶片，这是由于水分为此波段的主控因子[19]，叶片细胞因含水量的变化而膨胀或收缩，从而改变光在叶片内部的多次散射特性并影响叶片短波红外波段的光谱反射率。番茄叶霉病会导致番茄叶片皱缩枯萎，叶片水分降低，进而减少相应的光谱反射率。

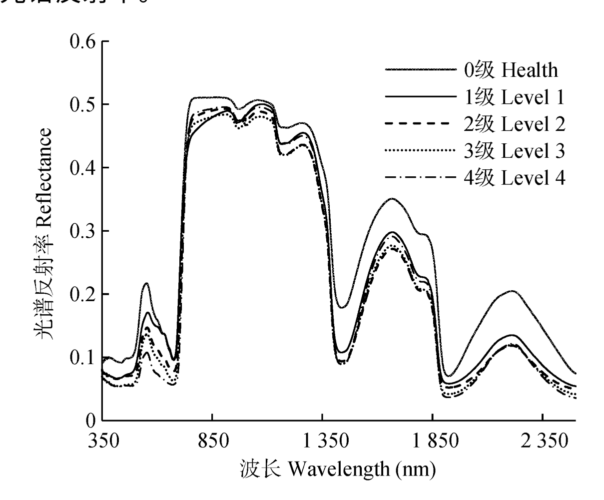


图 2　不同叶霉病病害等级的番茄叶片光谱反射率值
Fig. 2　Spectral reflectances at different *Fulvia fulva* morbidity levels of tomato leaf

3.2　基于光谱敏感度的特征波段选择

3.2.1　光谱敏感度

光谱敏感度(spectral sensitivity)最初被 Kobayashi 等[20]用于寻找受穗颈瘟胁迫水稻(*Oryza sativa*)植株的光谱响应敏感区域和敏感波段，构建光谱比值指数来估算穗颈瘟严重程度，并取得了较高的估算精度。其定义为“受胁迫水稻植株光谱和正常水稻植株光谱的差值与正常水稻植株光谱的比值”。

从图 3 可见：不同等级的光谱敏感度在 350~2 500 nm 大多为负值，表明在该波段范围内病害植株的光谱反射率均低于正常植株。绝对值越大，

表明病害植株同正常植株的差异越显著，反之亦然。在可见光和短波红外区域光谱敏感度绝对值较大，尤其是在 550~730 nm 的可见光波段及 1 860~2 260 nm 的短波红外波段。说明不同发病程度下可见光波段和短波红外波段番茄叶片的光谱反射率同正常植株叶片差异较大，随着病害等级的增加，番茄叶片光谱反射率逐渐降低。

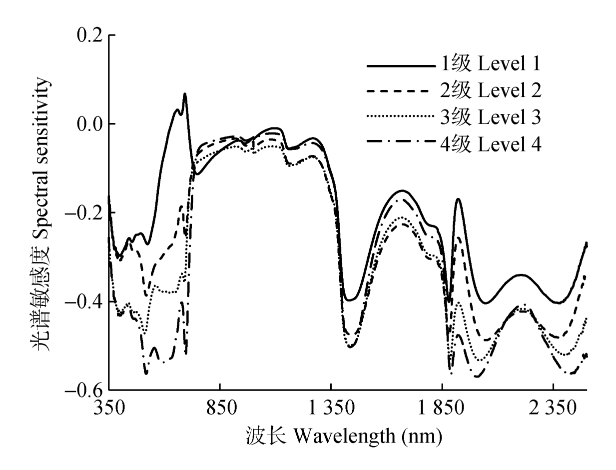


图 3 不同病害等级的番茄叶霉病光谱敏感度曲线

Fig. 3 Spectral sensitivity curves at different *Fulvia fulva* morbidity levels of tomato leaf

3.2.2 特征波段选择

进一步分析番茄叶片叶霉病发病程度与光谱敏感度的相关性，如图 4 所示，二者的相关性同光谱敏感度(图 3)曲线规律总体一致，在可见光波段(350~720 nm)相关性达极显著负相关水平，相关系数为 0.4~0.8；在 740~800 nm 达极显著正相关水平，相关系数较低，约为 0.3；在 1 400~1 575 nm、1 850~2 400 nm 波段内达极显著负相关。

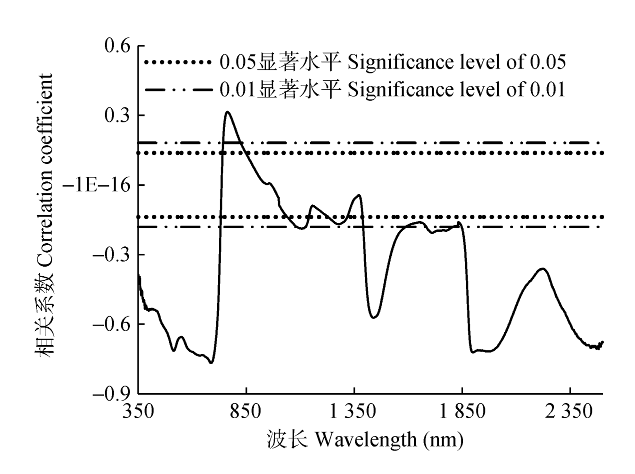


图 4 光谱敏感度与番茄叶霉病严重度的相关性

Fig. 4 Correlation between spectral sensitivity and *Fulvia fulva* morbidity levels of tomato leaf

3.3 基于特征吸收参量的发病程度建模估测

3.3.1 不同发病程度光谱吸收特征

由光谱敏感度分析及病害等级与光谱敏感度的相关性分析可知，可见光和短波红外区域是番茄叶霉病等级识别的敏感波段，尤其是在 550~730 nm 的可见光波段及 1 860~2 260 nm 的短波红外波段，是叶霉病发病程度识别的最佳波段。经包络线去除后，其相对反射率 R' (即去包络线)在可见光波段(550~730 nm)随着病害等级的加深而逐渐降低，形成明显的波谷(图 5a)。在短波红外波段(1 860~2 260 nm)不同病害等级间的相对反射率 R' 规律则没有这么明显，大致规律近似于可见光波段(图 5b)。

番茄受叶霉病侵染后，叶片上形成淡黄色病斑，发病严重时病斑密集，叶片发黄、卷曲、干枯，叶绿素和水分含量均明显降低，导致光谱特征发生变化。

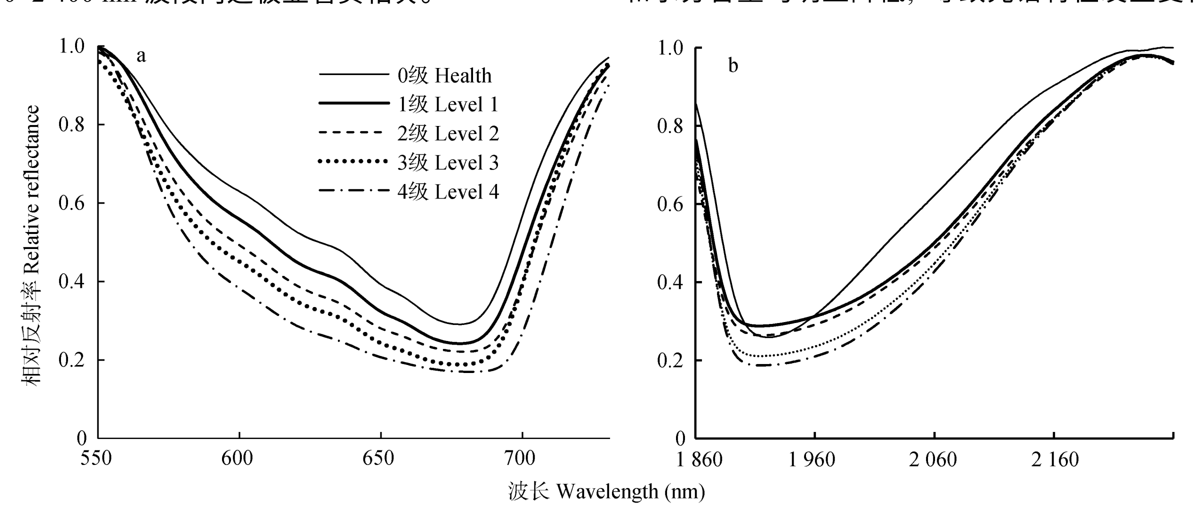


图 5 可见光波段(a)和短波红外波段(b)不同等级番茄叶霉病的番茄叶片相对反射率 (R')

Fig. 5 Relative reflectance of tomato leaf with different *Fulvia fulva* morbidity levels in visible band (a) and shortwave infrared band (b)

分析可见光区(550~730 nm)和短波红外光区(1 860~2 260 nm)不同病害等级番茄叶片光谱吸收特征参量最大波段深度 D_c、吸收峰面积 A、最大波段深度对应的波长位置 λ(表 1)发现：在可见光区病害植株的最大波段深度 D_{c1} 和吸收峰面积 A_1 均高于正常植株(0 级)，且随着病害等级的加重，D_{c1} 和 A_1 均明显增加，最大波段深度对应的波长 λ_1 则向短波方向移动；在短波红外区，不同处理植株的最大波段深度 D_{c2} 规律表现为：4 级>3 级>1 级>0 级>2 级，而吸收峰面积 A_2 则表现为：4 级>3 级>1 级>2 级>0 级，最大波段深度对应的波长 λ_1 则仍随着病害等级的加重向短波方向移动。

表 1　不同病害等级的番茄叶片光谱吸收特征参量

Table 1　Spectral absorption parameters of tomato leaf with different *Fulvia fulva* morbidity levels

发病程度 Morbidity degree	可见光 Visible band (550~730 nm)			短波红外 Shortwave infrared band (1 860~2 260 nm)		
	D_{c1}	A_1	λ_1	D_{c2}	A_2	λ_2
0 级 Health	0.71	74.25	682	0.74	213.78	1 921
1 级 Level 1	0.76	84.19	681	0.75	226.19	1 915
2 级 Level 2	0.78	89.00	679	0.71	219.19	1 914
3 级 Level 3	0.81	97.83	677	0.79	237.31	1 914
4 级 Level 4	0.83	108.13	677	0.81	260.99	1 913

D_{c1}：可见光波段最大波段深度；A_1：可见光波段吸收峰面积；λ_1：可见光波段最大波段深度对应的波长位置；D_{c2}：短波红外波段最大波段深度；A_2：短波红外波段吸收峰面积；λ_2：短波红外波段最大波段深度对应的波长位置。D_{c1}: the maximum absorption depth in visible band; A_1: the maximum absorption area in visible band; λ_1: the position of the maximum absorption depth in visible band; D_{c2}: the maximum absorption depth in shortwave infrared band; A_2: the maximum absorption area in shortwave infrared band; λ_2: the position of the maximum absorption depth in shortwave infrared band.

3.3.2　番茄叶霉病发病程度建模

综合以上分析，在去包络线的基础上，以可见光区和短波红外光区的光谱特征吸收参量为自变量，以番茄叶霉病病害等级为因变量，利用 150 个病害数据进行逐步回归(表 2)，筛选出 D_{c1}、A_2、D_{c2}、λ_1、λ_2 等自变量，其回归系数相伴概率均小于 0.05，建立逐步回归模型 y=45.95−15.69D_{c1}+0.09A_2−15.80D_{c2}−0.15λ_1+0.04λ_2，模型的决定系数 R^2 达 0.81 极显著水平。

表 2　番茄叶霉病病害等级的光谱吸收特征参数逐步回归模型

Table 2　Stepwise regression model of *Fulvia fulva* morbidity level of tomato leaf by spectral absorption parameters

回归方程 Regression equation	自变量 Independent	回归系数相伴概率 Regression coefficient probability	回归方程决定系数(R^2) Regression determination ratio
y=45.95−15.69x_1+0.09x_2−15.80x_3−0.15x_4+0.04x_5	x_1 (Dc_1)	0.00	0.81**
	x_2 (A_2)	0.00	
	x_3 (Dc_2)	0.00	
	x_4 (λ_1)	0.00	
	x_5 (λ_2)	0.02	

D_{c1}：可见光波段最大波段深度；A_1：可见光波段吸收峰面积；λ_1：可见光波段最大波段深度对应的波长位置；D_{c2}：短波红外波段最大波段深度；A_2：短波红外波段吸收峰面积；λ_2：短波红外波段最大波段深度对应的波长位置。D_{c1}: the maximum absorption depth in visible band; A_1: the maximum absorption area in visible band; λ_1: the position of the maximum absorption depth in visible band; D_{c2}: the maximum absorption depth in shortwave infrared band; A_2: the maximum absorption area in shortwave infrared band; λ_2: the position of the maximum absorption depth in shortwave infrared band.

3.4　番茄叶霉病发病程度估算模型精度检验

利用未参与建模的剩余 100 个样本的光谱数据作为检验样本，对表 2 所建立的逐步回归模型进行验证(图 6)，病害的预测等级和实测等级间相关性较强，均方根误差 RMSE 为 1.46，验证效果良好，因此可以用该模型预测番茄叶霉病病情等级。

4　讨论与结论

4.1　讨论

与传统的破坏性取样、室内化学分析等病害诊断方法相比，高光谱遥感具有快速、无损、实时等优点，加之其波段多、分辨率高、信息量大，能直接从作物“表观性”对病害进行诊断，在作物病害的宏

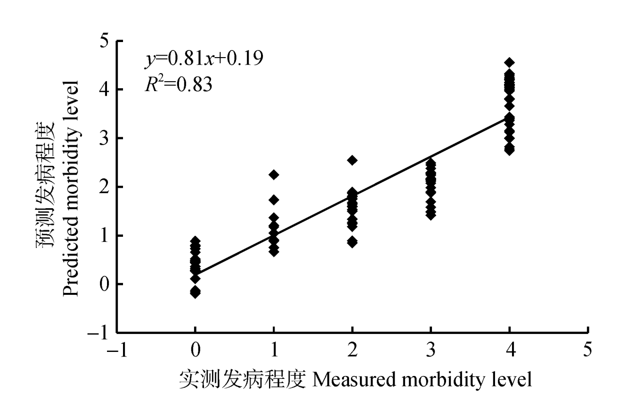


图 6 番茄叶霉病模型的预测发病程度与实测发病程度拟合

Fig. 6 Comparison of *Fulvia fulva* morbidity level of tomato leaf between the actual values and the estimated values of the stepwise regression mode

观监测方面具有较强的实际应用性，是病害诊断新的发展方向。

番茄受叶霉病侵染后，其叶片变黄、干枯、皱缩，对应的光谱反射率表现为：随发病程度加重，病叶光谱反射率在可见光区(350~720 nm)和短波红外光区(1 350~2 500 nm)均呈现降低趋势，这与前人的研究相吻合[21]。可见光波段光谱反射率的主控因素为色素，随着病害加重，叶片变黄，色素含量降低，对光吸收和反射均减少，导致反射率降低。但是多数研究认为可见光病害光谱的反射率高于健康植株[22-23]，本研究则规律相反。在近红外波段，叶片的光谱反射率主要受色素、叶片含水量和叶片内细胞组织结构等的影响，番茄叶霉病病害叶片光谱反射率低于健康植株，不仅因为病害植株的色素和水分含量迅速下降，更是由于受叶霉病侵染的番茄叶片叶肉细胞组织结构受到破坏，使得叶片光谱特征发生相应变化[24]。蒋金豹等[25]对大豆(*Glycine max*)不同病害的研究发现，普通花叶病和锈病引起的大豆光谱反射率同健康植株的差异在近红外区的规律相反，说明不同病害在同一作物上引起的光谱反应不同。而不同作物受不同病害侵染，光谱反射率间的差异更加复杂，与前人研究相左之处还有待于进一步验证。

利用光谱敏感度可寻找番茄叶霉病发病程度的光谱敏感波段，而连续统去除法则可增强感染病害植株与健康植株的光谱差异性，同时二者均可增大不同感病程度之间的光谱差异性，尤其是在可见光区和短波红外光区，其光谱差异性显著放大，有助于识别番茄叶霉病病害及其发病程度，同时对利用高光谱遥感监测农业病虫害具有借鉴意义。

4.2 结论

通过分析番茄叶霉病不同发病程度的叶片光谱反射率和光谱敏感度差异性等，得出以下结论：

1)番茄受叶霉病菌侵染后，不同病害等级叶片光谱曲线较正常植株均明显降低，进而导致病害植株的光谱敏感度大部分为负值。番茄叶霉病发病程度与光谱敏感度相关性较强的波段分别为：可见光波段的350~720 nm 及短波红外波段的 1 400~1 575 nm 和1 850~2 400 nm，均与发病程度呈极显著负相关。其中可见光区的 550~730 nm 波段及短波红外光区的1 860~2 260 nm 波段为番茄叶霉病发病程度识别的最佳敏感波段。

2)利用去包络线法对原始光谱反射率进行处理，提取的光谱吸收特征参数中，可见光区最大波段深度 D_{c1}、吸收峰面积 A_1、短波红外光区的最大波段深度 D_{c2} 和吸收峰面积 A_2 均整体呈现随着番茄叶霉病发病程度的加重而增大的趋势，而两个波段内的最大波段深度对应的波长位置 λ_1 和 λ_2 均随着病情严重度增加向短波方向移动。

3)利用光谱吸收特征参数 D_{c1}、A_2、D_{c2}、λ_1 和 λ_2 构建了番茄叶霉病病害严重度的逐步回归模型 $y=45.95-15.69D_{c1}+0.09A_2-15.80D_{c2}-0.15\lambda_1+0.04\lambda_2$，模型的决定系数 R^2 达 0.81 极显著水平，经独立样本验证后，均方根误差 RMSE 适中。表明模型的精确度和普适性均较好，由于模型是建立在叶片水平上，对于是否适用于冠层水平的大面积监测反演尚有待研究，不过利用去包络线法对光谱数据进行处理，提取光谱吸收特征参数，并建立病害预测模型的方法可为农作物病虫害的遥感监测及光谱数据处理提供参考。

参考文献 References

[1] 陈宇飞. 我国番茄叶霉病研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2000, 31(4): 411–414
Chen Y F. Research advance of tomato leaf mould in China[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2000, 31(4): 411–414

[2] 王晓艳, 汪炳良. 番茄叶霉病侵染机制及抗性机理研究进展[J]. 长江蔬菜: 学术版, 2008, (7B): 1–4
Wang X Y, Wang B L. Progress of infecting and resistant mechanism in tomato leaf mould[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2008, (7B): 1–4

[3] 孟凡娟, 许向阳, 李景富. 番茄叶霉病研究进展[J]. 中国农学通报, 2005, 21(6): 297–301
Meng F J, Xu X Y, Li J F. Progress in research on *Fulvia fulva* (Cook) of tomato caused by *Cladosporeum fulvum*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(6): 297–301

[4] 周勇, 于海霞, 贾丽慧, 等. 不同杀菌剂对防番茄叶霉病木霉菌叶片定殖效率的影响[J]. 天津农业科学, 2016, 22(1):

116–118
Zhou Y, Yu H X, Jia L H, et al. Effects of different fungicides on colonization efficiency of the leaves of tomato leaf mold[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2016, 22(1): 116–118
[5] 安静, 姚国清, 朱西存. 苹果叶片氮素含量高光谱检测研究[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(2): 67–71
An J, Yao G Q, Zhu X C. Study of hyperspectral detection for nitrogen content of apple leaves[J]. Remote Sensing for Land & Resource, 2016, 28(2): 67–71
[6] 贾方方, 张黎明, 任天宝, 等. 基于 BP 神经网络的烟草叶片质体色素高光谱反演[J]. 烟草科技, 2016, 49(7): 8–13
Jia F F, Zhang L M, Ren T B, et al. Hyperspectral inversion to estimate plastid pigment contents in tobacco leaves based on BP neural network[J]. Tobacco Science & Technology, 2016, 49(7): 8–13
[7] Moshou D, Bravo C, West J, et al. Automatic detection of 'yellow rust' in wheat using reflectance measurements and neural networks[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 44(3): 173–188
[8] Belasque J, Gasparoto M C G, Marcassa L G. Detection of mechanical and disease stresses in citrus plants by fluorescence spectroscopy[J]. Applied Optics, 2008, 47(11): 1922–1926
[9] Kokaly R F, Clark R N. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 67(3): 267–287
[10] 张雪红, 田庆久. 基于连续统去除法的冬小麦叶片氮积累量的高光谱评价[J]. 生态学杂志, 2010, 29(1): 181–186
Zhang X H, Tian Q J. Hyperspectral evaluation of nitrogen accumulation in winter wheat leaves based on continuum-removed method[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(1): 181–186
[11] 张金恒. 基于连续统去除法的水稻氮素营养光谱诊断[J]. 植物生态学报, 2006, 30(1): 78–82
Zhang J H. Rice nitrogen nutrition diagnosis using continuum-removed reflectance[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(1): 78–82
[12] 竞霞, 王纪华, 宋晓宇, 等. 棉花黄萎病病情严重度的连续统去除估测法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 193–198
Jing X, Wang J H, Song X Y, et al. Continuum removal method for cotton verticillium wilt severity monitoring with hyperspectral data[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 193–198
[13] 韩兆迎, 朱西存, 王凌, 等. 基于连续统去除法的苹果树冠 SPAD 高光谱估测[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 214–223
Han Z Y, Zhu X C, Wang L, et al. Hyperspectral evaluation of SPAD value of apple tree canopy based on continuum-removed method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 214–223
[14] 丁丽霞, 王志辉, 葛宏立. 基于包络线法的不同树种叶片高光谱特征分析[J]. 浙江林学院学报, 2010, 27(6): 809–814
Ding L X, Wang Z H, Ge H L. Continuum removal based hyperspectral characteristic analysis of leaves of different tree species[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2010, 27(6): 809–814
[15] 谢伯承, 薛绪掌, 刘伟东, 等. 基于包络线法对土壤光谱特征的提取及其分析[J]. 土壤学报, 2005, 42(1): 171–175
Xie B C, Xue X Z, Liu W D, et al. Hull-curve-method-based extraction and analysis of soil spectral characteristics[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(1): 171–175
[16] 李云海, 王桥, 黄家柱, 等. 地面遥感实验原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 45
Li Y H, Wang Q, Huang J Z, et al. Principle and Method of Ground Remote Sensing Experiment[M]. Beijing: Science Press, 2011: 45
[17] 张永贺, 陈文惠, 郭乔影, 等. 桉树叶片光合色素含量高光谱估算模型[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 876–887
Zhang Y H, Chen W H, Guo Q Y, et al. Hyperspectral estimation models for photosynthetic pigment contents in leaves of *Eucalyptus*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3): 876–887
[18] 贾方方, 马新明, 李春明, 等. 不同水分处理对烟草叶片高光谱及红边特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1330–1335
Jia F F, Ma X M, Li C M, et al. Effect of water condition on hyperspectral and red-edge characteristics of tobacco leaf[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(6): 1330–1335
[19] 刘良云. 植被定量遥感原理与应用[M]. 北京: 科学出版社: 2014: 32–33
Liu L Y. Principle and Application of Vegetation Quantitative Remote Sensing[M]. Beijing: Science Press, 2014: 32–33
[20] Kobayashi T, Kanda E, Kitada K, et al. Detection of rice panicle blast with multispectral radiometer and the potential of using airborne multispectral scanners[J]. Phytopathology, 2001, 91(3): 316–323
[21] 冯伟, 王晓宇, 宋晓, 等. 白粉病胁迫下小麦冠层叶绿素密度的高光谱估测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 114–123
Feng W, Wang X Y, Song X, et al. Hyperspectral estimation of canopy chlorophyll density in winter wheat under stress of powdery mildew[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(13): 114–123
[22] 陈兵, 王克如, 李少昆, 等. 病害胁迫对棉叶光谱反射率和叶绿素荧光特性的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 86–93
Chen B, Wang K R, Li S K, et al. The effects of disease stress on spectra reflectance and chlorophyll fluorescence characteristics of cotton leaves[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 86–93
[23] 袁琳, 张竞成, 赵晋陵, 等. 基于叶片光谱分析的小麦白粉病与条锈病区分及病情反演研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1608–1614
Yuan L, Zhang J C, Zhao J L, et al. Differentiation of yellow rust and powdery mildew in winter wheat and retrieving of disease severity based on leaf level spectral analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(6): 1608–1614
[24] Cai X Z, Takken F L W, Joosten M H A J, et al. Specific recognition of AVR4 and AVR9 results in distinct patterns of hypersensitive cell death in tomato, but similar patterns of defence-related gene expression[J]. Molecular Plant Pathology, 2001, 2(2): 77–86
[25] 蒋金豹, 李一凡, 郭海强, 等. 不同病害胁迫下大豆的光谱特征及识别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(10): 2775–2779
Jiang J B, Li Y F, Guo H Q, et al. Spectral characteristics and identification research of soybean under different disease stressed[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(10): 2775–2779